



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 116919376 A

(43) 申请公布日 2023. 10. 24

(21) 申请号 202310816687.5

G16H 10/60 (2018.01)

(22) 申请日 2023.07.05

G06F 30/23 (2020.01)

(71) 申请人 中国科学院力学研究所

G06F 17/11 (2006.01)

地址 100190 北京市海淀区北四环西路15号

G06F 17/15 (2006.01)

G06F 119/14 (2020.01)

(72) 发明人 李龙 吴海瑞 田晗菁 王小环 邵颖峰 郇勇 宋凡

(74) 专利代理机构 北京和信华成知识产权代理事务所(普通合伙) 11390

专利代理师 席卷

(51) Int. Cl.

A61B 5/03 (2006.01)

A61B 3/16 (2006.01)

A61B 3/10 (2006.01)

A61B 5/00 (2006.01)

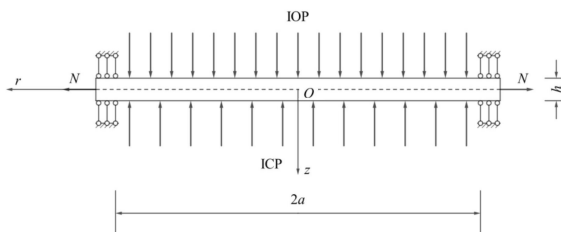
权利要求书4页 说明书9页 附图2页

(54) 发明名称

一种无创式颅内压测量方法

(57) 摘要

本发明提供了一种无创式颅内压测量方法,其先考虑筛板的几何特征、筛板所受外载及模型挠度与实验的吻合程度,基于Reissner型平板理论建立边界上受到巩膜拉力的夹支圆板模型以得到颅内压与眼内压、筛板半径、厚度、弹性模量、Poisson比及中心处挠度、眼球半径之间的定量关系,然后分别测出患者的眼内压、患者筛板半径、厚度及中心处挠度、患者筛板弹性模量,最后结合测出的患者眼内压、患者筛板半径、厚度及中心处挠度、患者筛板弹性模量的参数值,通过颅内压计算公式求得患者颅内压。本发明构思合理,流程简单,能精确、快速测量出患者颅内压,适于推广与应用。



1. 一种无创式颅内压测量方法,其特征在于:先考虑筛板的几何特征、筛板所受外载及模型挠度与实验的吻合程度,基于Reissner型平板理论建立边界上受到巩膜拉力的夹支圆板模型以得到颅内压与眼内压、筛板半径、厚度、弹性模量、Poisson比及中心处挠度、眼球半径之间的定量关系,然后分别测出患者的眼内压、患者筛板半径、厚度及中心处挠度、患者筛板弹性模量,最后结合测出的患者眼内压、患者筛板半径、厚度及中心处挠度、患者筛板弹性模量的参数值,通过颅内压计算公式求得患者颅内压。

2. 如权利要求1所述的无创式颅内压测量方法,其特征在于,所述基于Reissner型平板理论建立边界上受到巩膜拉力的夹支圆板模型以求得颅内压与眼内压、筛板半径、厚度、弹性模量、Poisson比及中心处挠度、眼球半径之间的定量关系的具体过程为:

基于Reissner型平板理论建立边界上受到巩膜拉力的夹支圆板模型,设定a为筛板半径,h为筛板厚度,N为巩膜拉力,IOP为眼内压,ICP为颅内压;

几何方程为:

$$\varepsilon_r = -z \frac{d\varphi_r}{dr} + \frac{du_0}{dr} \quad (1);$$

$$\varepsilon_\theta = -z \frac{\varphi_r}{r} + \frac{u_0}{r}$$

$$\gamma_{rz} = \frac{dw}{dr} - \varphi_r \quad (2);$$

式(1)与式(2)中, $\varepsilon_r$ 为径向正应变, $\varepsilon_\theta$ 为环向正应变, $z$ 为横截面上点的纵坐标, $r$ 为中面上点的径向坐标, $\varphi_r$ 为变形前垂直于中面的直线段在径向的转角,以逆时针为正方向, $u_0$ 为中面上点在 $r$ 方向上的位移,以沿 $r$ 轴正方向为正, $w$ 是筛板的挠度,以沿 $z$ 轴正方向为正;

考虑本构关系,有:

$$\sigma_r = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_r + \nu \varepsilon_\theta) \quad (3);$$

$$\sigma_\theta = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_\theta + \nu \varepsilon_r)$$

式(3)中, $\sigma_r$ 为径向正应力, $\sigma_\theta$ 为环向正应力, $E$ 为筛板的弹性模量, $\nu$ 为筛板的Poisson比;

将式(1)代入式(3),积分可得:

$$M_r = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_r z dz = -D \left( \frac{d\varphi_r}{dr} + \nu \frac{\varphi_r}{r} \right) \quad (4);$$

$$M_\theta = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_\theta z dz = -D \left( \frac{\varphi_r}{r} + \nu \frac{d\varphi_r}{dr} \right)$$

式(4)中, $M_r$ 为径向弯矩, $M_\theta$ 为环向弯矩, $D$ 为板的弯曲刚度, $D = Eh^3/[12(1-\nu^2)]$ ;

剪力 $Q_r$ 与剪应变 $\gamma_{rz}$ 有如下关系

$$Q_r = C \gamma_{rz} \quad (5);$$

即

$$Q_r = C \left( \frac{dw}{dr} - \varphi_r \right) \quad (6);$$

式(6)中,C为横向剪切刚度, $C=5Gh/6$ ;又

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

进而有:

$$C = \frac{5Eh}{12(1+\nu)}$$

考虑平衡,有:

$$\frac{M_r - M_\theta}{r} + \frac{dM_r}{dr} - Q_r = 0 \quad (7);$$

$$Q_r = -N_r \frac{dw}{dr} - \frac{1}{2}qr \quad (8);$$

式(8)中, $N_r$ 为径向拉力, $q=IOP-ICP$ ;

认为

$$N_r = N \quad (9);$$

则有:

$$Q_r = -N \frac{dw}{dr} - \frac{1}{2}qr \quad (10);$$

对于巩膜拉力N,采用如下方式确定:

将眼球看成半径为R的理想球体,由Laplace公式得:

$$2\pi R \cdot N = IOP \cdot \pi R^2 \quad (11);$$

进而有:

$$N = IOP \cdot R/2 \quad (12);$$

考虑式(6)与式(10),可得:

$$\frac{dw}{dr} = \frac{-\frac{1}{2C}qr + \varphi_r}{1 + \frac{N}{C}} \quad (13);$$

将上式(4)、(6)代入式(7),并考虑式(13),则有:

$$r^2 \frac{d^2\varphi_r}{dr^2} + r \frac{d\varphi_r}{dr} - \left( \frac{k^2}{a^2} r^2 + 1 \right) \varphi_r = \frac{qr^3}{2D \left( 1 + \frac{N}{C} \right)} \quad (14);$$

其中, $k^2 = Na^2 / \left[ D \left( 1 + \frac{N}{C} \right) \right]$ ;解得:

$$\varphi_r = C_1 I_1\left(\frac{k}{a}r\right) - \frac{qr}{2N} \quad (15);$$

其中,  $I_1$  是一阶第一类修正的Bessel函数,  $C_1$  为积分常数; 将式(15)代入式(13)并积分, 有:

$$w = \frac{1}{1 + \frac{N}{C}} \left[ C_1 \frac{a}{k} I_0\left(\frac{k}{a}r\right) - \frac{qr^2}{4N} - \frac{qr^2}{4C} + C_2 \right] \quad (16);$$

式(16)中,  $I_0$  是零阶第一类修正的Bessel函数,  $C_2$  为积分常数; 考虑边界条件, 即:

$$\begin{aligned} (\varphi_r)_{r=a} &= 0 \\ (w)_{r=a} &= 0 \end{aligned} \quad (17);$$

得:

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{qa}{2NI_1(k)} \\ C_2 &= -\frac{qa^2}{2NkI_1(k)} I_0(k) + \frac{qa^2}{4N} + \frac{qa^2}{4C} \end{aligned} \quad (18);$$

将式(18)代入式(16), 得筛板挠度的表达式为:

$$w = \frac{\text{IOP} - \text{ICP}}{1 + \frac{N}{C}} \left[ \frac{a \left[ I_0\left(\sqrt{\frac{N}{D\left(1 + \frac{N}{C}\right)}}a\right) - I_0\left(\sqrt{\frac{N}{D\left(1 + \frac{N}{C}\right)}}r\right) \right]}{2N \sqrt{\frac{N}{D\left(1 + \frac{N}{C}\right)}} I_1\left(\sqrt{\frac{N}{D\left(1 + \frac{N}{C}\right)}}a\right)} + \frac{a^2 - r^2}{4N} + \frac{a^2 - r^2}{4C} \right] \quad (19);$$

令  $r=0$ , 则有:

$$(w)_{r=0} = \frac{\text{IOP} - \text{ICP}}{1 + \frac{N}{C}} a^2 \left[ \frac{\left[ I_0\left(\sqrt{\frac{N}{D\left(1 + \frac{N}{C}\right)}}a\right) - 1 \right]}{2Na \sqrt{\frac{N}{D\left(1 + \frac{N}{C}\right)}} I_1\left(\sqrt{\frac{N}{D\left(1 + \frac{N}{C}\right)}}a\right)} + \frac{1}{4N} + \frac{1}{4C} \right] \quad (20);$$

稍作变形, 可得:

$$ICP = IOP - (w)_{r=0} \left(1 + \frac{N}{C}\right) \left[ \frac{1}{a^2 \frac{1 - I_0 \sqrt{\frac{N}{D \left(1 + \frac{N}{C}\right)} a}}{\sqrt{\frac{N}{D \left(1 + \frac{N}{C}\right)} a}} + \frac{1}{4N} + \frac{1}{4C}} \right] \quad (21);$$

至此,得到了颅内压ICP与眼内压IOP、筛板半径a、厚度h、弹性模量E、Poisson比 $\nu$ 及中心处挠度 $(w)_{r=0}$ 、眼球半径R之间的定量关系。

3. 如权利要求2所述的无创式颅内压测量方法,其特征在于:所述患者的眼内压IOP是使用Goldmann压平眼压计测出。

4. 如权利要求2所述的无创式颅内压测量方法,其特征在于:所述患者筛板半径a、厚度h及中心处挠度 $(w)_{r=0}$ 是借助OCT技术测出。

5. 如权利要求2所述的无创式颅内压测量方法,其特征在于:所述患者筛板弹性模量E是使用OCT技术并结合虚拟场方法测出。

6. 如权利要求2所述的无创式颅内压测量方法,其特征在于:所述患者筛板弹性模量E还可使用OCT技术并结合逆有限元方法测出。

7. 如权利要求2所述的无创式颅内压测量方法,其特征在于:所述筛板Poisson比 $\nu$ 取0.49,眼球半径R取12mm。

## 一种无创式颅内压测量方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及医疗检测技术领域,具体涉及一种无创式颅内压测量方法。

### 背景技术

[0002] 颅内压是颅腔内容物对颅腔壁产生的压力。急性颅脑创伤患者的颅内压可能会升高,如不能及时发现并处理升高颅内压,可能会危及患者生命,而低颅内压可能导致低颅内压综合征,因此颅内压的测量显得尤为重要。目前颅内压测量方法主要分为有创式和无创式两种。腰椎穿刺是一种常见的有创式测量方法,但其具有一定的危险性且可能造成感染。故医学上有对无创式颅内压测量的需求。

[0003] 生理条件下,颅内压作用在筛板后表面。筛板是位于视神经乳头中心处的多孔板状结构,在承受颅内压的同时,其前表面和边界处还分别受到眼内压和眼内压导致的巩膜拉力的作用。筛板在两类压力及巩膜拉力的作用下会发生变形。针对筛板在压力及拉力作用下的变形建立力学模型,导出了颅内压与眼内压、筛板的几何参数、生物力学性能和变形、眼球半径间的定量关系,为颅内压的无创式测量提供了一种新的理论方法。

### 发明内容

[0004] 本发明是为了解决颅内压测量及有创式颅内压测量会给患者带来额外风险的问题而提出了一种无创式颅内压测量方法,其构思合理,通过采用非侵入式测量手段测量筛板若干参数,利用这些参数与颅内压间的定量关系精确计算患者颅内压,实现了无创式颅内压测量且测量过程较为安全。

[0005] 为解决上述技术问题,本发明提供了一种无创式颅内压测量方法,先考虑筛板的几何特征、筛板所受外载及模型挠度与实验的吻合程度,基于Reissner型平板理论建立边界上受到巩膜拉力的夹支圆板模型以得到颅内压与眼内压、筛板半径、厚度、弹性模量、Poisson比及中心处挠度、眼球半径之间的定量关系,然后分别测出患者的眼内压、患者筛板半径、厚度及中心处挠度、患者筛板弹性模量,最后结合测出的患者眼内压、患者筛板半径、厚度及中心处挠度、患者筛板弹性模量的参数值,通过颅内压计算公式求得患者颅内压。

[0006] 所述无创式颅内压测量方法,其中,所述基于Reissner型平板理论建立边界上受到巩膜拉力的夹支圆板模型以求得颅内压与眼内压、筛板半径、厚度、弹性模量、Poisson比及中心处挠度、眼球半径之间的定量关系的具体过程为:

[0007] 基于Reissner型平板理论建立边界上受到巩膜拉力的夹支圆板模型,设定 $a$ 为筛板半径, $h$ 为筛板厚度, $N$ 为巩膜拉力, $IOP$ 为眼内压, $ICP$ 为颅内压;

[0008] 几何方程为:

$$[0009] \quad \varepsilon_r = -z \frac{d\varphi_r}{dr} + \frac{du_0}{dr} \quad (1);$$

$$\varepsilon_\theta = -z \frac{\varphi_r}{r} + \frac{u_0}{r}$$

$$[0010] \quad \gamma_{rz} = \frac{dw}{dr} - \varphi_r \quad (2);$$

[0011] 式(1)与式(2)中,  $\varepsilon_r$ 为径向正应变,  $\varepsilon_\theta$ 为环向正应变,  $z$ 为横截面上点的纵坐标,  $r$ 为中面上点的径向坐标,  $\varphi_r$ 为变形前垂直于中面的直线段在径向的转角, 以逆时针为正方向,  $u_0$ 为中面上点在 $r$ 方向上的位移, 以沿 $r$ 轴正方向为正,  $w$ 是筛板的挠度, 以沿 $z$ 轴正方向为正;

[0012] 考虑本构关系, 有:

$$[0013] \quad \sigma_r = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_r + \nu \varepsilon_\theta) \quad (3);$$

$$\sigma_\theta = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_\theta + \nu \varepsilon_r)$$

[0014] 式(3)中,  $\sigma_r$ 为径向正应力,  $\sigma_\theta$ 为环向正应力,  $E$ 为筛板的弹性模量,  $\nu$ 为筛板的Poisson比;

[0015] 将式(1)代入式(3), 积分可得:

$$[0016] \quad M_r = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_r z dz = -D \left( \frac{d\varphi_r}{dr} + \nu \frac{\varphi_r}{r} \right) \quad (4);$$

$$M_\theta = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_\theta z dz = -D \left( \frac{\varphi_r}{r} + \nu \frac{d\varphi_r}{dr} \right)$$

[0017] 式(4)中,  $M_r$ 为径向弯矩,  $M_\theta$ 为环向弯矩,  $D$ 为板的弯曲刚度,  $D = Eh^3/[12(1-\nu^2)]$ ;

[0018] 剪力 $Q_r$ 与剪应变 $\gamma_{rz}$ 有如下关系

$$[0019] \quad Q_r = C \gamma_{rz} \quad (5);$$

[0020] 即

$$[0021] \quad Q_r = C \left( \frac{dw}{dr} - \varphi_r \right) \quad (6);$$

[0022] 式(6)中,  $C$ 为横向剪切刚度,  $C = 5Gh/6$ ; 又

$$[0023] \quad G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

[0024] 进而有:

$$[0025] \quad C = \frac{5Eh}{12(1+\nu)}$$

[0026] 考虑平衡, 有:

[0027] 
$$\frac{M_r - M_\theta}{r} + \frac{dM_r}{dr} - Q_r = 0 \quad (7);$$

[0028] 
$$Q_r = -N_r \frac{dw}{dr} - \frac{1}{2}qr \quad (8);$$

[0029] 式(8)中,  $N_r$ 为径向拉力,  $q = \text{IOP} - \text{ICP}$ ;

[0030] 认为

[0031] 
$$N_r = N \quad (9);$$

[0032] 则有:

[0033] 
$$Q_r = -N \frac{dw}{dr} - \frac{1}{2}qr \quad (10);$$

[0034] 对于巩膜拉力 $N$ ,采用如下方式确定:

[0035] 将眼球看成半径为 $R$ 的理想球体,由Laplace公式得:

[0036] 
$$2\pi R \cdot N = \text{IOP} \cdot \pi R^2 \quad (11);$$

[0037] 进而有:

[0038] 
$$N = \text{IOP} \cdot R/2 \quad (12);$$

[0039] 考虑式(6)与式(10),可得:

[0040] 
$$\frac{dw}{dr} = \frac{-\frac{1}{2C}qr + \varphi_r}{1 + \frac{N}{C}} \quad (13);$$

[0041] 将上式(4)、(6)代入式(7),并考虑式(13),则有:

[0042] 
$$r^2 \frac{d^2 \varphi_r}{dr^2} + r \frac{d\varphi_r}{dr} - \left( \frac{k^2}{a^2} r^2 + 1 \right) \varphi_r = \frac{qr^3}{2D \left( 1 + \frac{N}{C} \right)} \quad (14);$$

[0043] 其中,  $k^2 = Na^2 / \left[ D \left( 1 + \frac{N}{C} \right) \right]$ ;解得:

[0044] 
$$\varphi_r = C_1 I_1 \left( \frac{k}{a} r \right) - \frac{qr}{2N} \quad (15);$$

[0045] 其中,  $I_1$ 是一阶第一类修正的Besse 1函数,  $C_1$ 为积分常数;将式(15)代入式(13)并积分,有:

[0046] 
$$w = \frac{1}{1 + \frac{N}{C}} \left[ C_1 \frac{a}{k} I_0 \left( \frac{k}{a} r \right) - \frac{qr^2}{4N} - \frac{qr^2}{4C} + C_2 \right] \quad (16);$$

[0047] 式(16)中,  $I_0$ 是零阶第一类修正的Besse 1函数,  $C_2$ 为积分常数;

[0048] 考虑边界条件,即:



$$[0049] \quad \begin{aligned} (\varphi_r)_{r=a} &= 0 \\ (w)_{r=a} &= 0 \end{aligned} \quad (17);$$

[0050] 得:

$$[0051] \quad \begin{aligned} C_1 &= \frac{qa}{2NI_1(k)} \\ C_2 &= -\frac{qa^2}{2NkI_1(k)}I_0(k) + \frac{qa^2}{4N} + \frac{qa^2}{4C} \end{aligned} \quad (18);$$

[0052] 将式(18)代入式(16),得筛板挠度的表达式为:

$$[0053] \quad w = \frac{IOP - ICP}{1 + \frac{N}{C}} \left[ \frac{a \left[ I_0 \left( \sqrt{\frac{N}{D \left( 1 + \frac{N}{C} \right)}} a \right) - I_0 \left( \sqrt{\frac{N}{D \left( 1 + \frac{N}{C} \right)}} r \right) \right]}{2N \sqrt{\frac{N}{D \left( 1 + \frac{N}{C} \right)}} I_1 \left( \sqrt{\frac{N}{D \left( 1 + \frac{N}{C} \right)}} a \right)} + \frac{a^2 - r^2}{4N} + \frac{a^2 - r^2}{4C} \right] \quad (19);$$

[0054] 令 $r=0$ ,则有:

$$[0055] \quad (w)_{r=0} = \frac{IOP - ICP}{1 + \frac{N}{C}} a^2 \left[ \frac{\left[ I_0 \left( \sqrt{\frac{N}{D \left( 1 + \frac{N}{C} \right)}} a \right) - 1 \right]}{2Na \sqrt{\frac{N}{D \left( 1 + \frac{N}{C} \right)}} I_1 \left( \sqrt{\frac{N}{D \left( 1 + \frac{N}{C} \right)}} a \right)} + \frac{1}{4N} + \frac{1}{4C} \right] \quad (20);$$

[0056] 稍作变形,可得:

$$[0057] \quad ICP = IOP - (w)_{r=0} \left( 1 + \frac{N}{C} \right) \left[ \frac{1}{a^2 \left[ \frac{1 - I_0 \left( \sqrt{\frac{N}{D \left( 1 + \frac{N}{C} \right)}} a \right)}{2Na \sqrt{\frac{N}{D \left( 1 + \frac{N}{C} \right)}} I_1 \left( \sqrt{\frac{N}{D \left( 1 + \frac{N}{C} \right)}} a \right)} + \frac{1}{4N} + \frac{1}{4C} \right]} \right] \quad (21);$$

[0058] 至此,得到了颅内压ICP与眼内压IOP、筛板半径 $a$ 、厚度 $h$ 、弹性模量 $E$ 、Poisson比 $\nu$

及中心处挠度 $(w)_{r=0}$ 、眼球半径 $R$ 之间的定量关系。

[0059] 所述无创式颅内压测量方法,其中:所述患者的眼内压IOP是使用Goldmann压平眼压计测出。

[0060] 所述无创式颅内压测量方法,其中:所述患者筛板半径 $a$ 、厚度 $h$ 及中心处挠度 $(w)_{r=0}$ 是借助OCT技术测出。

[0061] 所述无创式颅内压测量方法,其中:所述患者筛板弹性模量 $E$ 是使用OCT技术并结合虚拟场方法测出。

[0062] 所述无创式颅内压测量方法,其中:所述患者筛板弹性模量 $E$ 还可使用OCT技术并结合逆有限元方法测出。

[0063] 所述无创式颅内压测量方法,其中:所述筛板Poi sson比 $\nu$ 取0.49,眼球半径 $R$ 取12mm。

[0064] 采用上述技术方案,本发明具有如下有益效果:

[0065] 本发明无创式颅内压测量方法构思合理,通过建立较为合理的筛板力学模型,基于平衡得到颅内压与眼内压、筛板的几何参数、生物力学性能和变形间的定量关系,再通过测量眼内压、筛板的几何参数、生物力学性能和变形间接测量出颅内压,测量过程无创且较为安全,解决了颅内压测量及有创式颅内压测量会给患者带来额外风险的问题,适于推广与应用。

## 附图说明

[0066] 为了更清楚地说明本发明具体实施方式或现有技术中的技术方案下面将对具体实施方式或现有技术描述中所需要使用的附图作简单地介绍,显而易见地,下面描述中的附图是本发明的一些实施方式,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0067] 图1为本发明无创式颅内压测量方法中建立的边界上受到巩膜拉力的夹支圆板模型示意图;

[0068] 图2为本发明无创式颅内压测量方法中筛板所受外载的三维示意图;

[0069] 图3为本发明无创式颅内压测量方法中筛板的内力示意图。

## 具体实施方式

[0070] 下面将结合附图对本发明的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0071] 下面结合具体的实施方式对本发明做进一步的解释说明。

[0072] 如图1所示,本实施例提供的无创式颅内压测量方法,主要包括以下步骤:

[0073] 1) 力学模型构建

[0074] 考虑筛板的几何特征(其可以看作一个圆板)、筛板所受外载(其受眼内压、颅内压和巩膜拉力)及模型挠度与实验的吻合程度,基于Reissner型平板理论建立如图1所示的边界上受到巩膜拉力的夹支圆板模型。设定 $a$ 为筛板半径, $h$ 为筛板厚度, $N$ 为巩膜拉力,IOP为眼内压,ICP为颅内压。

[0075] 筛板所受外载的三维示意图如图2所示,根据载荷和结构的对称性,判断该问题为一轴对称问题;筛板的内力如图3所示。

[0076] 几何方程为:

$$[0077] \quad \varepsilon_r = -z \frac{d\varphi_r}{dr} + \frac{du_0}{dr} \quad (1);$$

$$\varepsilon_\theta = -z \frac{\varphi_r}{r} + \frac{u_0}{r}$$

$$[0078] \quad \gamma_{rz} = \frac{dw}{dr} - \varphi_r \quad (2);$$

[0079] 式(1)与式(2)中, $\varepsilon_r$ 为径向正应变, $\varepsilon_\theta$ 为环向正应变, $z$ 为横截面上点的纵坐标, $r$ 为中面上点的径向坐标, $\varphi_r$ 为变形前垂直于中面的直线段在径向的转角,以逆时针为正方向, $u_0$ 为中面上点在 $r$ 方向上的位移,以沿 $r$ 轴正方向为正, $w$ 是筛板的挠度,以沿 $z$ 轴正方向为正。

[0080] 考虑本构关系,有:

$$[0081] \quad \sigma_r = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_r + \nu\varepsilon_\theta) \quad (3);$$

$$\sigma_\theta = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_\theta + \nu\varepsilon_r)$$

[0082] 式(3)中, $\sigma_r$ 为径向正应力, $\sigma_\theta$ 为环向正应力, $E$ 为筛板的弹性模量, $\nu$ 为筛板的Poisson比。

[0083] 将式(1)代入式(3),积分可得:

$$[0084] \quad M_r = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_r z dz = -D \left( \frac{d\varphi_r}{dr} + \nu \frac{\varphi_r}{r} \right) \quad (4);$$

$$M_\theta = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_\theta z dz = -D \left( \frac{\varphi_r}{r} + \nu \frac{d\varphi_r}{dr} \right)$$

[0085] 式(4)中, $M_r$ 为径向弯矩, $M_\theta$ 为环向弯矩, $D$ 为板的弯曲刚度, $D = Eh^3/[12(1-\nu^2)]$ ;

[0086] 剪力 $Q_r$ 与剪应变 $\gamma_{rz}$ 有如下关系

$$[0087] \quad Q_r = C \gamma_{rz} \quad (5);$$

[0088] 即

$$[0089] \quad Q_r = C \left( \frac{dw}{dr} - \varphi_r \right) \quad (6);$$

[0090] 式(6)中 $C$ 为横向剪切刚度, $C = 5Gh/6$ ;又

$$[0091] \quad G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

[0092] 进而有:

$$[0093] \quad C = \frac{5Eh}{12(1+\nu)}$$

[0094] 考虑平衡,有:

$$[0095] \quad \frac{M_r - M_\theta}{r} + \frac{dM_r}{dr} - Q_r = 0 \quad (7);$$

$$[0096] \quad Q_r = -N_r \frac{dw}{dr} - \frac{1}{2}qr \quad (8);$$

[0097] 式(8)中,  $N_r$  为径向拉力,  $q = \text{IOP} - \text{ICP}$ ;

[0098] 认为

$$[0099] \quad N_r = N \quad (9);$$

[0100] 则有:

$$[0101] \quad Q_r = -N \frac{dw}{dr} - \frac{1}{2}qr \quad (10);$$

[0102] 对于巩膜拉力  $N$ , 采用如下方式确定:

[0103] 将眼球看成半径为  $R$  的理想球体, 由Laplace公式得:

$$[0104] \quad 2\pi R \cdot N = \text{IOP} \cdot \pi R^2 \quad (11);$$

[0105] 进而有:

$$[0106] \quad N = \text{IOP} \cdot R/2 \quad (12);$$

[0107] 考虑式(6)与式(10), 可得:

$$[0108] \quad \frac{dw}{dr} = \frac{-\frac{1}{2C}qr + \varphi_r}{1 + \frac{N}{C}} \quad (13);$$

[0109] 将上式(4)、(6)代入式(7), 并考虑式(13), 则有:

$$[0110] \quad r^2 \frac{d^2 \varphi_r}{dr^2} + r \frac{d\varphi_r}{dr} - \left( \frac{k^2}{a^2} r^2 + 1 \right) \varphi_r = \frac{qr^3}{2D \left( 1 + \frac{N}{C} \right)} \quad (14);$$

[0111] 其中,  $k^2 = Na^2 / \left[ D \left( 1 + \frac{N}{C} \right) \right]$ ; 解得:

$$[0112] \quad \varphi_r = C_1 I_1 \left( \frac{k}{a} r \right) - \frac{qr}{2N} \quad (15);$$

[0113] 其中,  $I_1$  是一阶第一类修正的Bessel函数,  $C_1$  为积分常数; 将式(15)代入式(13), 并积分, 有:

$$[0114] \quad w = \frac{1}{1 + \frac{N}{C}} \left[ C_1 \frac{a}{k} I_0 \left( \frac{k}{a} r \right) - \frac{qr^2}{4N} - \frac{qr^2}{4C} + C_2 \right] \quad (16);$$

[0115] 式(16)中,  $I_0$ 是零阶第一类修正的Bessel函数,  $C_2$ 为积分常数。

[0116] 考虑边界条件, 即:

$$\begin{aligned} [0117] \quad & (\varphi_r)_{r=a} = 0 \\ & (w)_{r=a} = 0 \end{aligned} \quad (17);$$

[0118] 得:

$$\begin{aligned} [0119] \quad & C_1 = \frac{qa}{2NI_1(k)} \\ & C_2 = -\frac{qa^2}{2NkI_1(k)}I_0(k) + \frac{qa^2}{4N} + \frac{qa^2}{4C} \end{aligned} \quad (18);$$

[0120] 将式(18)代入上式(16), 得筛板挠度的表达式为:

$$[0121] \quad w = \frac{\text{IOP} - \text{ICP}}{1 + \frac{N}{C}} \left[ \frac{a \left[ I_0 \left( \sqrt{\frac{N}{D \left( 1 + \frac{N}{C} \right)}} a \right) - I_0 \left( \sqrt{\frac{N}{D \left( 1 + \frac{N}{C} \right)}} r \right) \right]}{2N \sqrt{\frac{N}{D \left( 1 + \frac{N}{C} \right)}} I_1 \left( \sqrt{\frac{N}{D \left( 1 + \frac{N}{C} \right)}} a \right)} + \frac{a^2 - r^2}{4N} + \frac{a^2 - r^2}{4C} \right] \quad (19);$$

[0122] 令  $r=0$ , 则有:

$$[0123] \quad (w)_{r=0} = \frac{\text{IOP} - \text{ICP}}{1 + \frac{N}{C}} a^2 \left[ \frac{\left[ I_0 \left( \sqrt{\frac{N}{D \left( 1 + \frac{N}{C} \right)}} a \right) - 1 \right]}{2Na \sqrt{\frac{N}{D \left( 1 + \frac{N}{C} \right)}} I_1 \left( \sqrt{\frac{N}{D \left( 1 + \frac{N}{C} \right)}} a \right)} + \frac{1}{4N} + \frac{1}{4C} \right] \quad (20);$$

[0124] 稍作变形, 可得:

$$[0125] \quad ICP = IOP - (w)_{r=0} \left(1 + \frac{N}{C}\right) \left[ \frac{1}{a^2 \left( 1 - I_0 \left( \sqrt{\frac{N}{D \left(1 + \frac{N}{C}\right) a}} \right) \right)} + \frac{1}{4N} + \frac{1}{4C} \right] + \frac{2Na \sqrt{\frac{N}{D \left(1 + \frac{N}{C}\right)}} I_1 \left( \sqrt{\frac{N}{D \left(1 + \frac{N}{C}\right) a}} \right)}{a^2} \quad (21);$$

[0126] 至此,得到了颅内压ICP与眼内压IOP、筛板半径a、厚度h、弹性模量E、Poisson比ν及中心处挠度 $(w)_{r=0}$ 、眼球半径R之间的定量关系。

[0127] 2) 测量

[0128] 使用Goldmann压平眼压计测出患者的眼内压IOP,借助OCT技术测出患者筛板半径a、厚度h及中心处挠度 $(w)_{r=0}$ ,使用OCT技术并结合虚拟场方法或逆有限元方法测出患者筛板弹性模量E。筛板Poisson比ν取0.49,眼球半径R取12mm。将各项参数(即眼内压IOP、患者筛板半径a、厚度h及中心处挠度 $(w)_{r=0}$ 、筛板弹性模量E、Poisson比ν和眼球半径R)代入式(21),可得患者颅内压。

[0129] 以下为具体算例:

[0130] 不同假想参数下,患者的颅内压见表1。

[0131] 表1不同参数下患者的颅内压

	IOP/mmHg	a/mm	h/mm	$(w)_{r=0}/\mu\text{m}$	E/MPa	ICP/mmHg
[0132]	12	0.95	0.3	10	0.3	5.49
	19	0.98	0.25	8	0.25	13.82
	24	1.13	0.36	5	0.23	20.63

[0133] 本发明构思合理,通过采用非侵入式测量手段测量筛板若干参数,利用这些参数与颅内压间的定量关系精确计算患者颅内压,实现了无创式颅内压测量且测量过程较为安全。

[0134] 最后应说明的是:以上各实施例仅用以说明本发明的技术方案,而非对其限制;尽管参照前述各实施例对本发明进行了详细的说明,本领域的普通技术人员应当理解:其依然可以对前述各实施例所记载的技术方案进行修改,或者对其中部分或者全部技术特征进行等同替换;而这些修改或者替换,并不使相应技术方案的本质脱离本发明各实施例技术方案的范围。

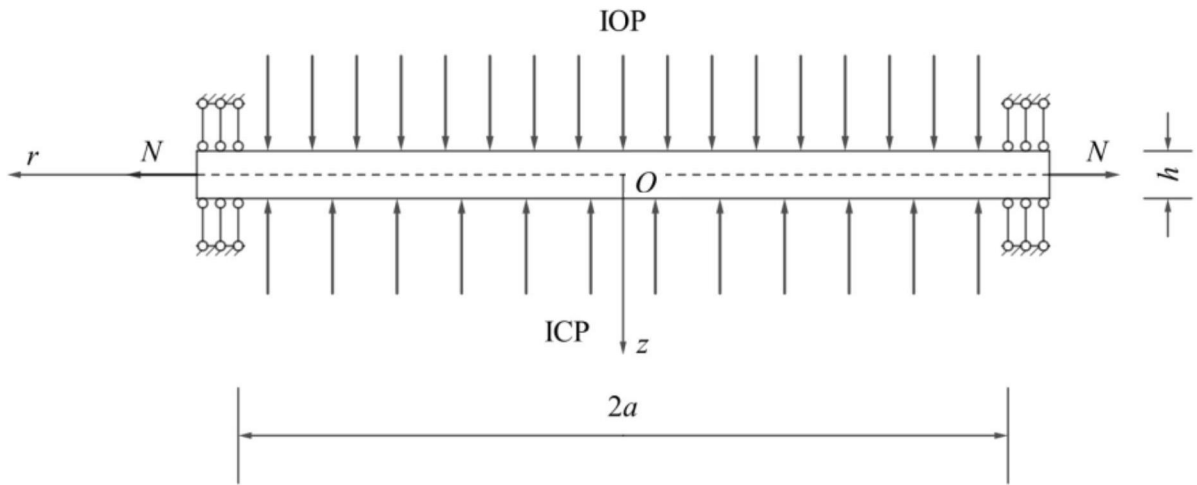


图1

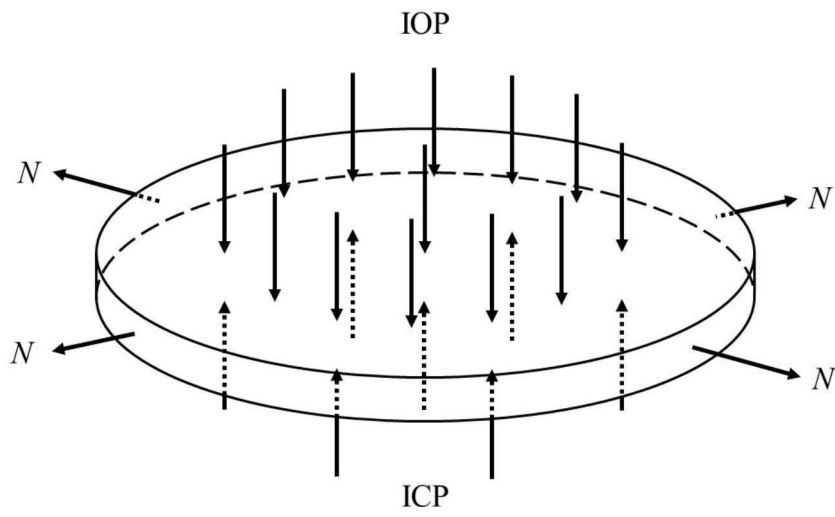


图2

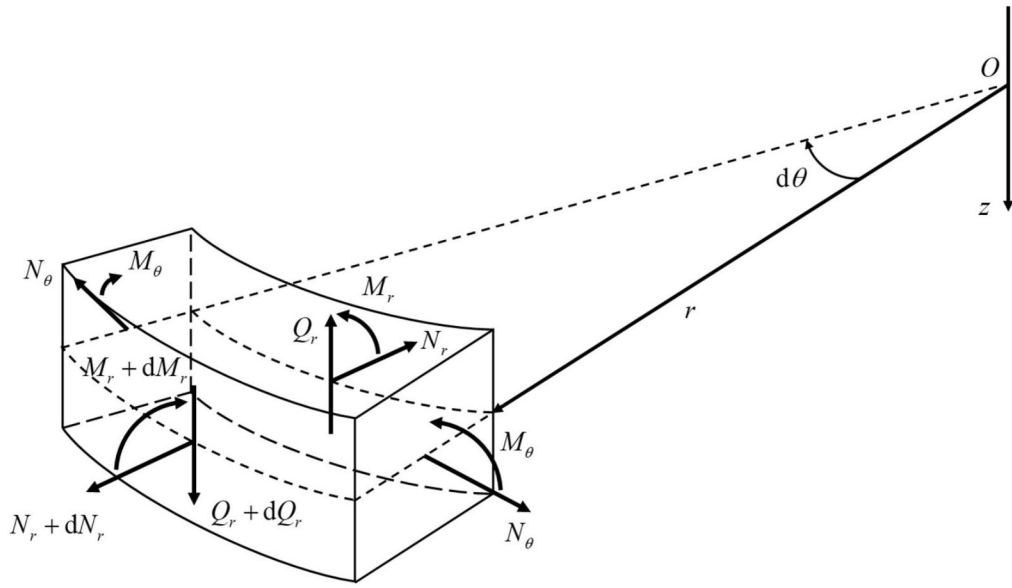


图3